

# 有限要素法解析による 軟弱地盤上箱型基礎 工法の有効性について

坂井 晃 | 佐賀大学理工学部建設工学科 助教授

甲本達也 | 佐賀大学農学部生物生産学科 教授

## 1. まえがき

軟弱地盤上に構造物を築造する場合には、地盤のせん断破壊や圧密による地盤沈下等の弊害を防ぐために、その構造物に適した何らかの基礎工法を施すことが一般的である。従来から、軟弱地盤における構造物の基礎工法としては、支持杭工法、深層改良工法、および圧密促進工法等が用いられてきた。しかし、支持杭工法では構造物本体は変形しないものの、広域地盤沈下や盛土等によって周辺地盤の沈下が大きくなり、杭のネガティブフリクションや段差による構造物の機能障害等の新たな問題が引き起こされている。また、これらの工法は、軟弱地盤の層厚が数十mにも達する場合にはコスト的にも高くなる上に、維持補修も含めた対応策まで検討しなければならない場合も多い。したがって、近年では、このような問題点に対処するために、支持杭に頼らない浅層改良工法、摩擦杭工法および補強土工法等の浮き基礎タイプの基礎工法が見直されつつある。しかし、これら浮き基

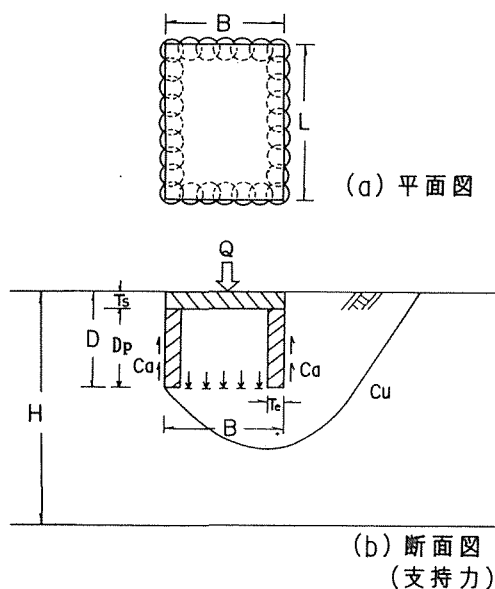
礎形式は歴史的には古いものの、これらのメカニズムおよび変形量を十分考慮した設計法が確立されていないのが現状である。

本研究は、軟弱地盤における構造物の基礎工法として、経済的かつ不同沈下に有効な浮き基礎タイプの一つである箱型基礎工法(SBF工法(the Stabilized Box Foundation method)の試験施工<sup>1)</sup>が佐賀平野の軟弱な有明粘土地盤上で行われたのを機会に、本試験施工を対象にした有限要素法による変形解析を行い、実測値と比較検討した。また、載荷荷重や箱型基礎の改良杭の長さの異なる種々の条件下に対しても変形解析を行い、構造物基礎としての箱型基礎の有効性について解析的検討を加えた。

## 2. 箱型基礎の試験施工概要

### 2.1 箱型基礎工法<sup>1)2)3)</sup>

箱型基礎工法(SBF工法)は、構造物施工予定の軟弱地盤内において、地盤改良杭を連結した箱型の垂直壁と表層改良により作成した床版とを組み合わせたものである。図-1は、粘土地盤に設置されたB\*Lの



図一 箱型基礎の模式図

長方形箱型基礎の模式図である。Hは粘土層の厚さ、Dは垂直壁の深さ、Teは地盤改良杭の有効径（垂直壁の厚さ）、Tsは表層改良床版の厚さである。この基礎工法の特徴としては、沈下と支持力に関してそれぞれ以下のことがあげられる。

れ以下のことがあげられる。

①垂直壁により構造物下地盤の沈下・側方流動を抑制する。また、構造物荷重を土中へ分散させて荷重の増分を軽減するとともに、荷重の地盤への伝達位置を下げて圧密粘土層の厚さを薄くすることによって圧密沈下量を低減することができる。

②垂直壁の摩擦力によって支持力増加を図ると同時に、垂直壁と床版下の内部の土を一体化させ、根入れを有する基礎としての機能を発揮させることによって支持力の増加を図る。

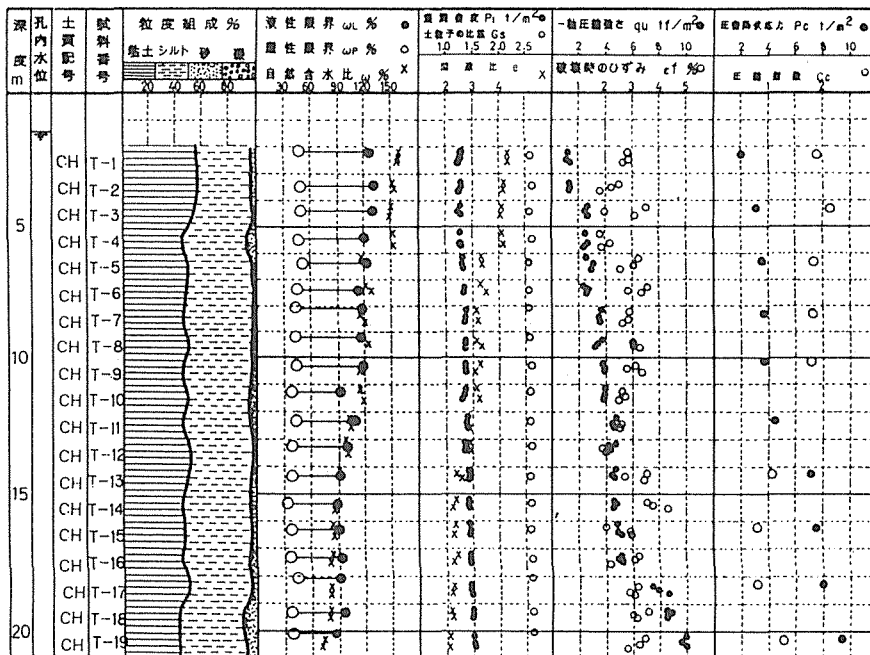
箱型基礎の全支持力Qは、基礎底部の支持力Qpと基礎壁面の摩擦力Qsとの和として次式で表される2)。

$$Q = Q_p + Q_s = q_f \cdot B \cdot L + 2Ca(B+L) \cdot D/3(1)$$

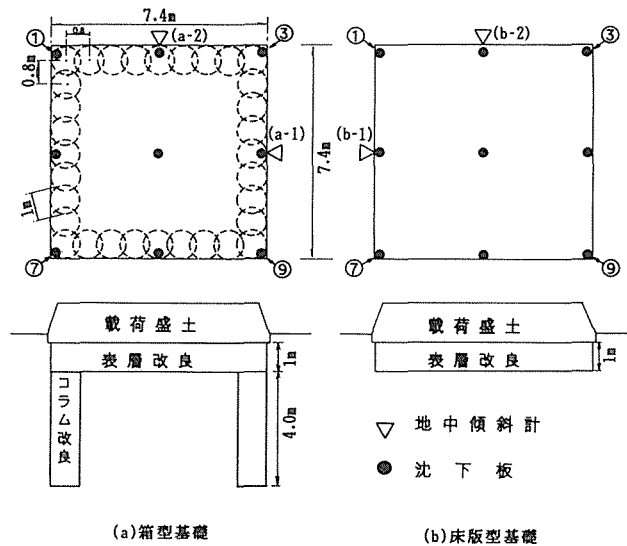
ここに、 $q_f$ は地盤の極限支持圧、Caは壁面における粘性土の付着強さ（非排水せん断強さCu）である。

## 2. 2 試験施工概要

本試験施工は、箱型基礎工法の支持力増加および沈下抑制効果を実物大にて確認す



図二 有明粘土地盤の土質試験結果



図一 3 試験施工の概要図

ることを目的として実施されたものである。試験施工の現場は、佐賀県白石町の水田転換畑地であり、約20m厚の軟弱な沖積粘土（有明粘土）層が堆積している。この有明粘土の土質特性は、図一 2 に示されるように、粘土上層部においては不攪乱試料の一軸圧縮強さ： $q_u=13-40\text{kPa}$ ，自然含水比： $w=100-150\%$ で液性限界よりも大きく、典型的な有明粘土地盤といえる。

図一 3 (a)(b)は、本試験施工において実施された箱型基礎と床版型基礎の概要図である。図(a)は地盤改良杭（アスコラム工法により施工）をオーバーラップさせて垂直壁を箱型に施工した後、表層改良工法により作成した床版を組み合わせた箱型基礎である。一方、図(b)は表層改良工法により作成した床版型基礎であり、箱型基礎におけるコラム改良体の影響を明らかにするために比較施工法として実施したものである。箱型基礎及び床版型基礎の施工条件は以下の通りである。基礎幅： $7.4\text{m} \times 7.4\text{m}$ の正方形，床版厚さ  $T_s=1\text{m}$ ，改良深さ  $D=5\text{m}$ ，地盤改良杭：杭径  $\phi a=1000\text{mm}$ ，有効径  $T_e=600\text{mm}$ ，長さ  $D_p=4\text{m}$ ，本数  $n=32$ 本。載荷荷重としては、一般の木造住宅を想定した  $q=1.58\text{tf/m}^2$ の盛土荷重（山土

$\gamma t=1.60\text{tf/m}^3$ ）を使用している。

本試験施工における動態観測は、図一 3 に示されるように、それぞれ基礎の表面沈下および側方変位を測定するために設置された沈下板と地中傾斜計によって行われた。沈下板は、 $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ の正方形板の中心に立てた丸棒を使用し、両基礎ともに基礎表面の中央と端部に計 9ヶ所設置されている。また、地中傾斜計はコラム改良体の位置に挿入型傾斜計ガイドを取り付けた傾斜計が使用され、各深さ位置における傾斜角から側方変位の深さ方向分布が求められている。この地中傾斜計は、基礎端面の中央にコラム改良体の長さと同じ深さ 5 m まで各々 2ヶ所（ $a-1$ ， $a-2$ ），（ $b-1$ ， $b-2$ ）設置されている。

### 3. 箱型基礎地盤の有限要素法解析

#### 3. 1 解析概要

##### (1) 解析手法

地盤の力学的挙動は一般に非線形であり、特に軟弱地盤においては荷重に対する変形量も大きく材料非線形性が顕著になる。従来、このような土の挙動を記述する方法として塑性論を適用した理論が数多く提案されてきたが、カムクレイモデル<sup>4)</sup>は現在で

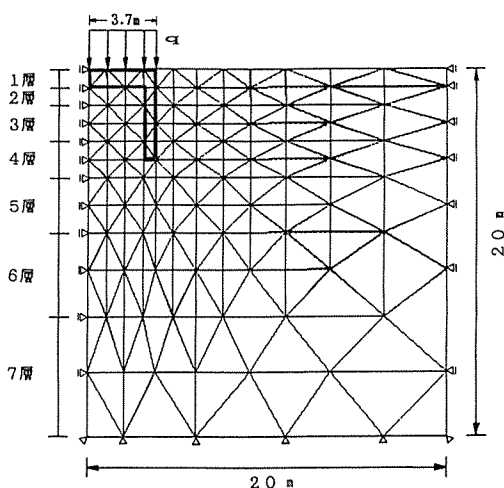


図-4 解析メッシュ図

も粘性土の有用な弾塑性モデルとして使用されている。本解析に用いたプログラム CRISP<sup>5)</sup>は、弾性解析はもちろんのことカムクレイモデルによる排水解析、非排水解析および圧密解析など地盤変形解析プログラムとしては汎用性が高く、かつ精度的にも信頼性の高いプログラムである。

本解析では、カムクレイモデルと BIOT 型圧密方程式を連成させた圧密解析を行い、載荷荷重に対する構造物基礎地盤の変形の

経時変化を求めた。

## (2) 解析条件

解析対象となった地盤は、図-2に示された軟弱な有明粘土地盤である。図-4は、解析に用いた高さ20m・幅20mの領域を有する有明粘土の地盤メッシュ図であり、左上端部が基礎中央部に位置している。解析上の基礎は、試験工区の土質性状より深さ20mに設定した。解析領域の左右の境界は水平方向(X方向)の変位を拘束し、底面は固定端としている。また、地下水位は地表面に設定し、かつ地表面と底面の両面排水条件にて解析を行った。図中の太線部分は、床版(幅3.7m、厚さ1m)およびコラム改良体(幅70cm、長さ4m)を示したものであり、山土による載荷荷重 $q=1.58\text{tf/m}^2$ は、基礎表面に等分布荷重として与えた。

解析に用いた土質諸定数は、粘土地盤の土質試験結果に基づいて7つの層に分割した。これら解析に用いた詳しい土質諸条件を示したのが表-1である。有明粘土層の地盤モデルとしてはカムクレイモデルを使用した。このモデルパラメータは、M:限界状態における応力比 $q/p$ ,  $\lambda$ ,  $\kappa$ :正規圧密および過圧密領域における $e-\ln p$ 曲線の

表-1 解析地盤の土質諸条件

材料番号	材料タイプ	標高 (m)	単位体積重量 $\gamma$ ( $\text{t/m}^3$ )	カムクレイモデルパラメータ		ポアソン比 $\nu$	ヤング率 E ( $\text{t/m}^2$ )	透水係数 K ( $\text{m/day}$ )	間隙比 e	静止土圧係数 K <sub>0</sub>	鉛直応力 $\sigma_v$ ( $\text{t/m}^2$ )	圧密降伏力 p c' ( $\text{t/m}^2$ )
				M	C <sub>c</sub> , $\lambda$ , $\kappa$							
	▽ =		20.0							0.811	0.450	0.471 0.620
1	粘土層	19.0	1.284	1.2	C <sub>c</sub> =1.9 $\lambda$ =0.825 $\kappa$ =0.124	0.45	50	7.70 E-4	4.268	0.802	0.734	0.770 0.921
2		18.0	1.284				50	6.75 E-4	4.150	0.793	1.020	1.074 1.392
3		16.0	1.304				92	5.50 E-4	3.969	0.774	1.628	1.727 2.077
4		14.0	1.332				145	4.21 E-4	3.734	0.756	2.292	2.447 3.031
5		11.0	1.366				208	3.04 E-4	3.441	0.729	3.390	3.661 4.679
6		6.5	1.418	C <sub>c</sub> =1.1 $\lambda$ =0.477 $\kappa$ =0.072		307	1.82 E-4	2.994	0.688	5.272	5.796 7.598	
7		0.0	1.494			449	8.82 E-5	2.554	0.630	8.485	9.622	
8	表層改良	弾性体	1.296			0.3	6000	7.70 E-4				
9	コラム改良		1.296				4050	5.50 E-4				

傾き、の3個である。なお、圧密降伏応力  $p_c'$  は、カムクレイモデルの降伏条件式  $p_c' = p \cdot \exp(q/Mp)$  より求めた。床版とコラム改良体は弾性体と仮定し、ヤング率  $E$  としては一軸圧縮試験から得られた  $E_{50}$  を用いた。また、静止土圧係数  $K_0$  は、 $K_0 = 0.44 + 0.42 \times 10^{-2} I_p$  (Massarsch, 1979) の関係を使用した。試験施工が実施された床版基礎・箱型基礎は、基礎幅が  $7.4\text{m} \times 7.4\text{m}$  の正方形であり厳密には三次元の解析が必要であるが、本解析では、二次元状態の軸対称および平面ひずみを想定して解析を行った。なお、精度の良い非線形解析結果を得るために、載荷荷重 ( $q = 1.58\text{tf/m}^2$ ) の計算分割数としては、箱型基礎および無改良地盤ともにほぼ解析値が収束した8分割を用いている。

本解析では、試験施工 ( $q = 1.58\text{tf/m}^2$ , コラム改良体の長さ  $4.0\text{m}$ ・厚さ  $70\text{cm}$  の条件) が実施された床版基礎・箱型基礎の変形解析を行い、地表面の沈下・側方変位についてそれぞれ実測値と比較した。また、箱型基礎の変形抑止効果をより明らかにするために、無改良地盤を対象にした解析結果も加え比較検討を行っている。さらに、箱型基礎を用いたときの地盤の変形・応力に与える載荷荷重やコラム改良体の影響を明らかにするために、載荷荷重 ( $4.0, 6.0, 8.0\text{tf/m}^2$ )、コラム改良体の長さ ( $2.0, 6.5\text{m}$ ) の異なった種々の条件下についても解析を実施した。

### 3. 2 解析結果

#### —実測値と解析値との比較—

##### (1) 沈下挙動

図-5は、盛土中央直下における粘土地盤表面の沈下曲線である。箱型基礎の解析沈下量は、実測値の傾向と同様、床版型基礎の沈下量に比べて小さな値を示している。特に、軸対称解析における箱型基礎の沈下低減率は顕著であり、平面ひずみと軸対称解析との間にさほど差異が見られない床版型と異なって、改良杭を連結した箱型の垂直壁による沈下抑制効果が十分認められる。また、無改良地盤の解析沈下量 (軸対称) に比べた場合、床版型基礎では約4割、箱型基礎では約9割にも及ぶ沈下低減となっている。

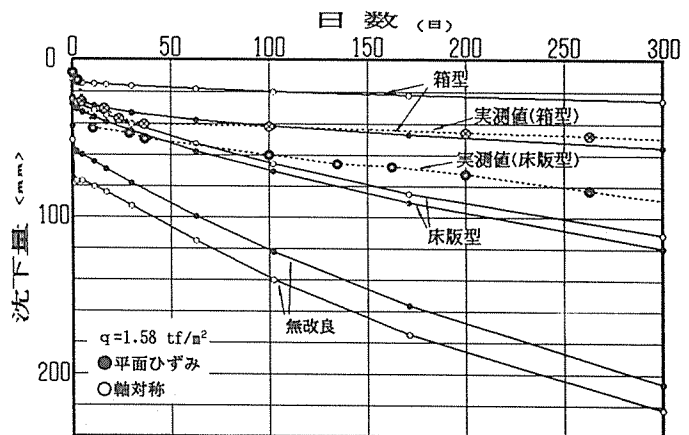


図-5 盛土中央直下の沈下曲線 ( $q = 1.58\text{tf/m}^2$ )

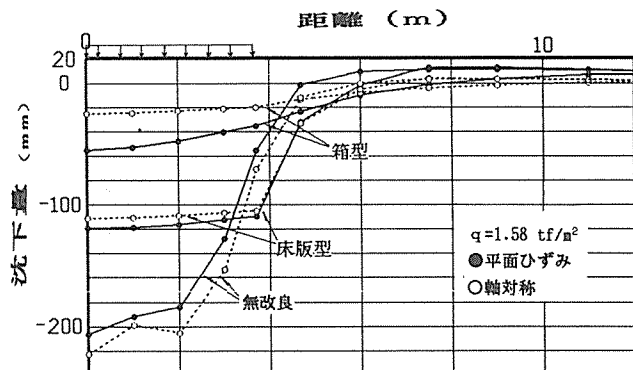
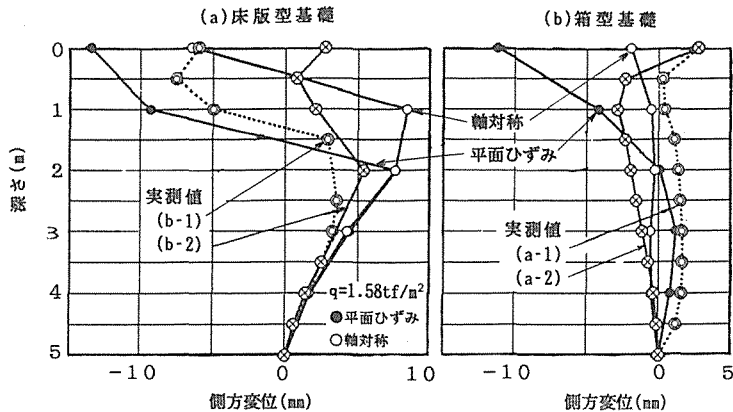


図-6 地表面の沈下分布 ( $q = 1.58\text{tf/m}^2$ , 載荷後300日目)



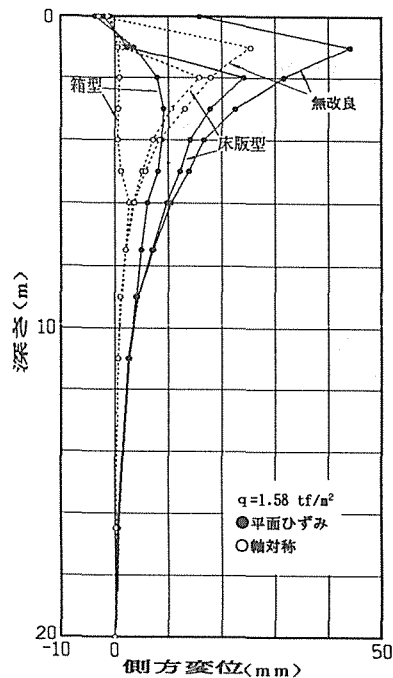
図一七 側方変位分布(深さ 5 m を基準)( $q=1.58\text{tf/m}^2$ , 载荷後264日目)

一方、解析によって得られた地表面の沈下分布を図一6に示す。無改良地盤の場合には、沈下量だけでなく周辺地盤の隆起も大きい。基礎工法を施した地盤では、盛土部の傾きが小さく周辺の隆起も少ない。特に、箱型基礎(軸対称解析)では、基礎部と周辺地盤との間の不同沈下が小さい。これらの結果は、箱型基礎工法が床版型基礎よりもかなり大きな沈下抑制が期待できる優れた工法であることを示唆している。

## (2) 側方変位

図一7(a)(b)は、試験施工によって得られた側方変位の実測値と解析値を比較したものである。ここに、側方変位量は、現場計測深さ5mの位置を基準にプロットしている。床版型および箱型基礎の側方変位を比較すると、各2地点の実測値にわずかな差異はあるものの、明らかに箱型基礎のコラム改良体による側方変位の低減効果が認められる。また、本解析においては、平面ひずみよりも軸対称条件下における解析結果の方が、地表面付近における側方変位の変化傾向は小さく、今回の実測値の分布形状に近い結果となった。

図一8は、解析によって得られた箱型・床版型・無改良の基礎端部における深さ方向の側方変位を示したものである。この図から、側方変位は、沈下量の傾向と同様に、



図一八 基礎端部における側方変位分布( $q=1.58\text{tf/m}^2$ , 载荷後300日目)

無改良・床版型・箱型の順に小さく、軸対称(平面ひずみ)条件下における床版型と箱型の最大側方変位は、それぞれ無改良地盤の約4割、8～9割に低減している。これらのことから、箱型基礎におけるコラム改良体は、沈下だけでなく側方変位の抑制効果にも十分寄与しているのがわかる。また、その最大側方変位の生じる位置が、無

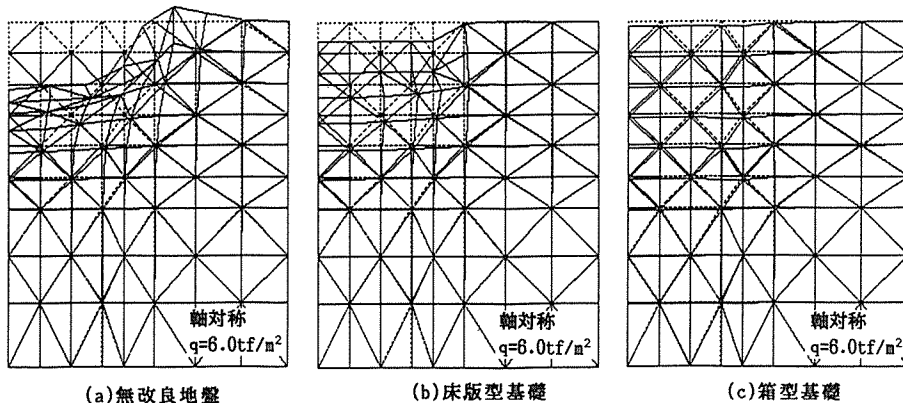


図-9 変形図( $q=6.0\text{tf/m}^2$ , 載荷後300日目)

改良・床版型・箱型の順に次第に深くなることもこれら基礎形式の特徴の一つである。

#### 4. 箱型基礎地盤に関する解析的検討

##### 4.1 載荷荷重の影響

###### (1) 変形挙動

図-9(a)~(c)は、載荷荷重  $q = 6.0\text{tf/m}^2$  を受けるときの軸対称条件下における無改良地盤・床版型基礎・箱型基礎の変形図をそれぞれ示したものである。無改良地盤では、沈下・側方変位ともに大きくなり、周辺地盤の隆起・水平変位に与える影響も大きい。一方、コラム改良体を有する箱型基礎は、改良体底部まで沈下領域が広がっているものの、床版型基礎に比べても沈下・側方変位ともにかなり小さく、基礎地盤の

変形抑止工法としての有用性が認められる。

これら各基礎の沈下に及ぼす載荷荷重の影響を明らかにするために、図-10には、経過日数300日目における盛土中央直下の沈下量を各載荷荷重 ( $q = 1.58 \sim 8.0\text{tf/m}^2$ ) に対してプロットしている。本解析の載荷荷重の範囲内では、箱型基礎は、無改良地盤に見られるような載荷荷重の増加に伴う急激な沈下傾向は見られず、載荷荷重が大きくなるほどその沈下抑制効果が大きくなる特徴がある。また、床版型基礎の沈下は、無改良地盤に比べて小さいものの、 $q = 6.0\text{tf/m}^2$  を越える付近から沈下の急増傾向が見られる。

一方、載荷荷重  $q = 6.0\text{tf/m}^2$  における各基礎工法の側方変位分布を示したのが、

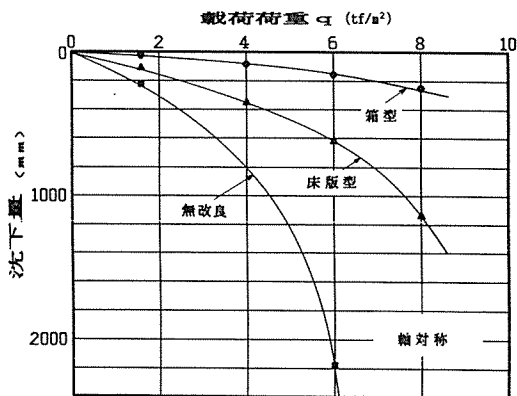


図-10 載荷荷重  $q$  と沈下量の関係 (載荷後300日目)

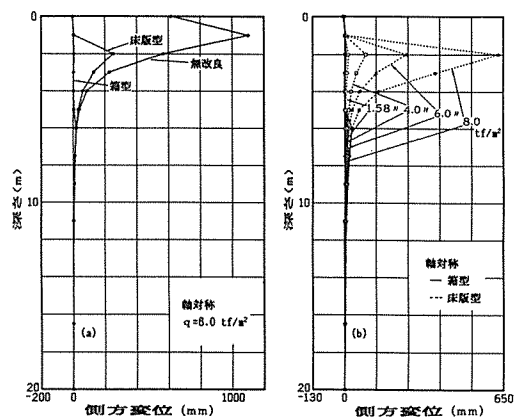


図-11 側方変位分布(載荷後300日目)

図-11(a)である。この載荷荷重に対する箱型基礎の最大側方変位は、無改良および床版型の場合の約3%，約20%の値しか示していない。ただし、最大側方変位が生じる深さは、無改良・床版型・箱型の順にそれぞれ1 m，2 m，6 mと深くなっており、箱型基礎ではコラム改良体底部の地盤がわずかではあるが外側へ変位する傾向が認められる。図-11(b)は、箱型基礎と床版型基礎の側方変位分布に及ぼす載荷荷重の影響について示したものである。載荷荷重は、1.58～8.0tf/m<sup>2</sup>の範囲で4ケースについて解析を行っている。この載荷荷重の範囲内では、床版型の場合、載荷荷重の増加に伴って側方変位が急増しているが、箱型基礎に

おいてはその傾向は微小であり、コラム改良体による側方変位の低減効果を窺うことができる。

## (2) 地盤の応力状態

図-12(a)～(c)は、載荷荷重 $q = 6.0\text{tf/m}^2$ を受けるときの軸対称条件下における各基礎地盤の主応力分布を示したものである。盛土直下の地盤の主応力は、無改良・床版型・箱型の順に小さく、特に箱型基礎における応力増分はコラム改良体によって無改良地盤の約5割程度に減少している。また、箱型基礎のコラム改良体よりも外側の周辺地盤に対する応力分散は、改良体底面より幾分上部の位置から生じており、したがってそれ以浅の地盤領域における応力増分は

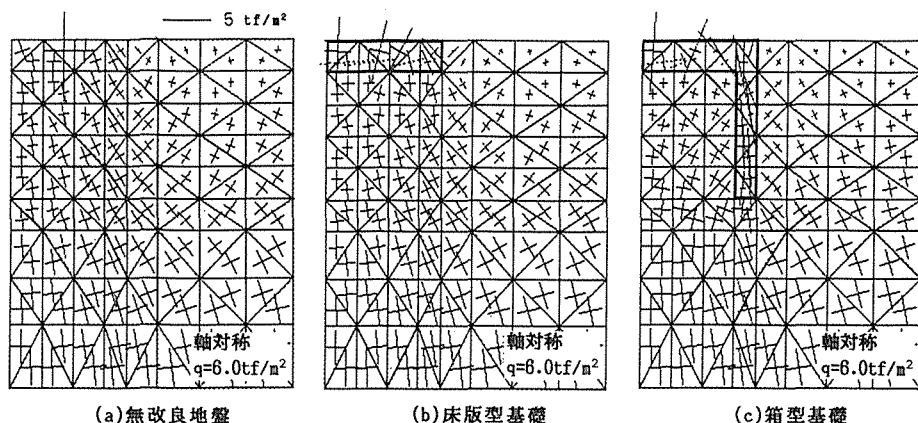


図-12 主応力分布( $q = 6.0\text{tf/m}^2$ ，載荷後300日目)

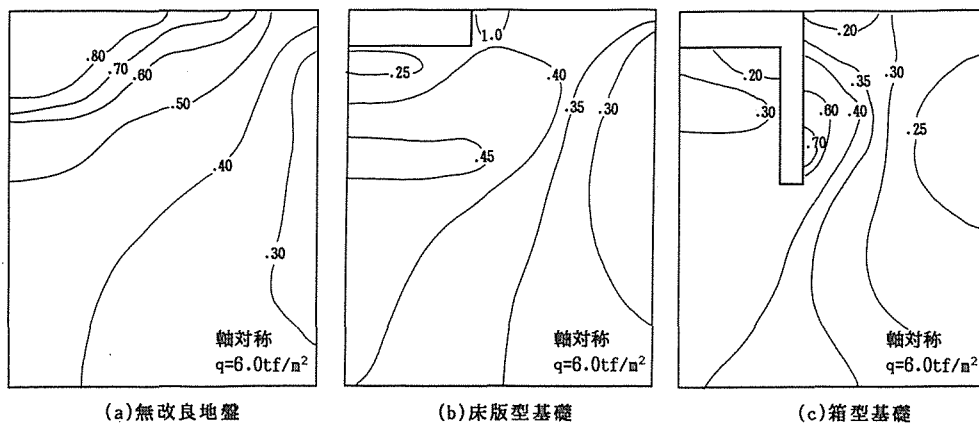


図-13  $\eta/M$  のコンター図( $q = 6.0\text{tf/m}^2$ ，載荷後300日目)



小さくなっている。

図-13(a)~(c)は、図-12と同じ荷重条件下における無改良地盤・床版型基礎・箱型基礎の  $\eta/M$  のコンター図である。ここに、 $\eta (=q/p')$  は応力比、 $M$  は土の限界状態における応力比の値であり、これらの比  $\eta/M$  はその地点の限界状態に対する応力状態を表している。 $\eta/M = 0$  は等方応力状態、 $\eta/M = 1.0$  は限界状態であり、 $\eta/M$  の値が大きくなるほど破壊に近いことを意味している。無改良地盤の  $\eta/M$  の値は、分布荷重の応力増分によって盛土中央部を中心に順次深さ方向に減少する傾向が見られるが、床版型基礎では床版の応力分散効果によって床版直下の  $\eta/M$  の値の増加は小さくなっている。一方、箱型基礎の  $\eta/M$  の値は、コラム改良体で囲まれた部分や周辺地盤の載荷荷重に対する応力増分が小さいために、床版型よりも小さな値の分布形状を示している。しかし、コラム改良体の外側下方における  $\eta/M$  の値は、逆に大きな応力増加が見られ限界状態に近い値を示しているが、これは改良体と地盤との間のすべりを考慮していないことに因るものと考えられる。

#### 4. 2 コラム改良体の長さの影響

箱型基礎におけるコラム改良体が、基礎地盤の変形抑制効果に重要な役割を果たしていることは、すでに床版型基礎との比較から明らかにしてきた。しかし、地盤の変形抑止効果として最も効果的な改良体長さを検討しておくことは経済コストの面からも重要である。ここでは、基礎地盤の変形特性に及ぼすコラム改良体長さの影響を明らかにするために、実施された試験施工(改良体長さ  $D_p = 4.0\text{m}$ )に加え、改良体長さ  $D_p = 2.0\text{m}$  と  $6.5\text{m}$  の2ケースについても試験施工と同じ荷重条件下において解析を行った。ここでは、改良体長さの増加に伴う沈下量の減少傾向を明らかにするために、図-14に示すような  $D/B$  (コラム改良体の深さ:  $D$ , 表層改良体の幅:  $B$ ) とそのと

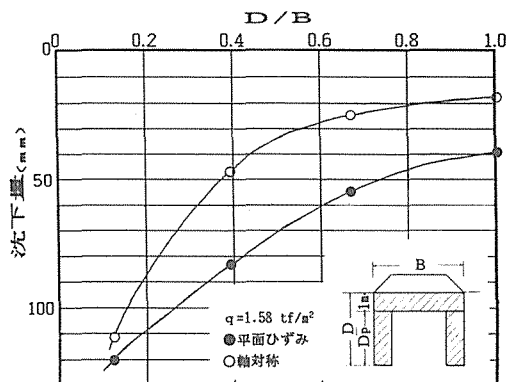


図-14  $D/B$ と沈下量の関係(荷重後300日目)

きの盛土中央直下における沈下量(経過日数300日目)との関係をプロットした。この図から、箱型基礎の沈下量は、 $D/B$ の値が増加するほど、すなわちコラム改良体の長さが長くなるほど、小さくなる傾向にあるが、軸対称条件下では  $D/B = 0.6$ 、平面ひずみ条件下では  $D/B = 0.8$  付近から沈下の低下率が減少しており、これ以上改良体長さを長くしても沈下抑制効果にあまり寄与しないことがわかる。

#### 5. 結 論

本論文は、佐賀平野の軟弱地盤上で行われた箱型基礎工法の試験施工を対象に有限要素法解析を実施して、その基礎工法としての有用性について解析的検討を行った。これらの結果は、以下に示すとおりである。

(1) 試験施工における箱型基礎工法は、実測値・解析値ともに床版型基礎よりも大きな沈下・側方変位の抑止効果が認められた。

(2) 箱型基礎工法は、本解析の載荷荷重 ( $q = 1.58 \sim 8.0 \text{tf/m}^2$ ) の範囲内では、床版型基礎に比べて載荷荷重が増加するほど基礎地盤の沈下抑止効果が一層増大し、基礎と周辺部との不同沈下防止にも大変有効である。また、箱型基礎の改良体に囲まれた部分の地盤応力だけでなく、改良体より外側の周辺地盤における地表面付近の応力増

分も小さくなり、基礎として有効な応力分散をもたらすことができる。

以上のことから、コラム改良体を有する箱型基礎工法は、軟弱地盤上における浮き基礎として大きな変形抑止効果、支持力増加が期待できる工法といえる。

(3) 箱型基礎におけるコラム改良体の長さは、長くなるほど基礎の沈下および周辺地盤への影響は小さくなる。しかし、その沈下低減率は、改良体長さが長くなるほど低下し、軸対称条件下においては $D/B=0.6$ 以上に改良体長さを長くしても大きな沈下抑制効果の向上は期待できない。

謝辞：本研究は文部省科学研究費（試験研究(B)研究代表者佐賀大学農学部教授 加来研）の援助を受けて行っている研究の一部である。記して謝意を表します。

#### 参考文献

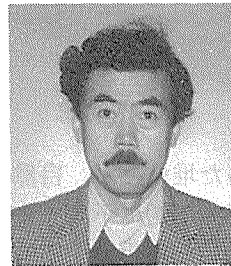
- 1) 甲本達也・大塚泰孝・近藤信光：箱型基礎工法による有明粘土地盤上構造物の沈下制御効果，農業土木学会論文集，Vol. 161，pp. 85-89，1992
- 2) 甲本達也：軟弱地盤における箱型基礎の支持力機構，農業土木学会論文集，Vol. 159，pp. 53-56，1992
- 3) 甲本達也・近藤信光：箱型基礎工法（SBF工法）を用いた砂／粘土系二層地盤上ビル基礎の設計・施工例，基礎工，pp. 122-126，1991
- 4) Schofield, A.N. and Wroth, C.P.: Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill Book Company, 1968
- 5) Britto, A.M. and Gunn, M.J.: CRITICAL STATE SOIL MECHANICS VIA FINITE ELEMENTS, Ellis Horwood Limited, 1987

#### ■ 著者略歴



**坂井 晃**  
(さかい あきら)

1983年 九州大学博士課程  
1990年 佐賀大学理工学部助教授  
工学博士



**甲本 達也**  
(こうもと たつや)

1972年 九州大学大学院  
農学研究科単位取得退学  
1993年 佐賀大学農学部教授  
農学博士